

В. К. ГУСЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук каф. ИИТС НТУ „ХПИ”
Е. А. БОРИСЕНКО, аспирант каф. ИИТС НТУ „ХПИ”

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПО ТОЧНОСТИ ПОДХОДА К ИЗМЕРЕНИЮ УРОВНЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

В статті розглянемо методи компенсації похибок при вимірюванні рівня за допомогою ультразвуку. Проаналізовані чинники, що впливають на результуючу похибку. Зроблено висновок про те, який з них доцільніше використовувати.

Paper describes methods of level measurement of ultrasonic means decrease. Causes influences on resulting error are analyzed. Conclusion about suitability each of them is made.

Постановка проблемы. При построении высокоточных ультразвуковых измерителей уровня возникает необходимость выявления и устранения факторов, способных существенно снизить точность измерений. Среди наиболее значимых можно выделить факторы окружающей среды – температура, давление, влажность и прочие. Можно назвать два основных пути устранения их влияния. Первый: нужно точно их измерить и, зная зависимость от них основного информативного параметра – скорости ультразвука – исключить путем введения соответствующих поправок. При таком решении поставленной задачи появляется возможность организации многофункциональной измерительной системы. Второй – предусмотреть процедуру периодической автоматической поверки, для чего в схему прибора вводится дополнительный ультразвуковой датчик, измеряющий фиксированное расстояние; по данным снятым с этого датчика вычисляется фактическая скорость ультразвука, таким образом, учитываются одновременно все влияющие факторы.

Цель статьи – определить, какой из двух методов устранения погрешностей предпочтительнее.

Анализ литературы показывает, что ответ на вопрос, каким образом можно наиболее эффективно компенсировать погрешность измерения уровня ультразвуковым методом остается открытым. Встречающиеся в литературе рассуждения на эту тему опираются в основном на данные о морально устаревших измерительных преобразователях.

Рассмотрим ультразвуковой измеритель уровня. Наиболее простая схема такого измерителя содержит излучатель ультразвуковых сигналов и приемник [3] (рис. 1).

На рис. 2 представлена временная диаграмма работы ультразвукового измерителя уровня. Старт и стоп импульсы формируются в момент начала изучения и момент приема отраженного сигнала соответственно. Интервал времени между старт и стоп импульсами заполняется импульсами стабильной частоты, число которых N_x затем подсчитывается.

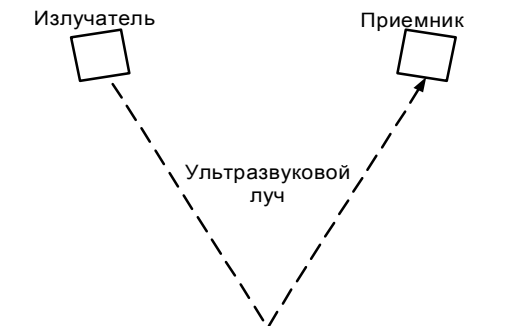


Рис. 1. Простейший ультразвуковой измеритель уровня

Измеренное расстояние определяется из соотношения:

$$S = ct_{\text{и}}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения звука в среде, м/с; $t_{\text{и}} = N_x t_i$ — время прохождения ультразвуковой волны в среде. Поскольку из (1) очевидно, что информативным параметром является скорость ультразвука, возникает необходимость выявления факторов, способных ее изменить.

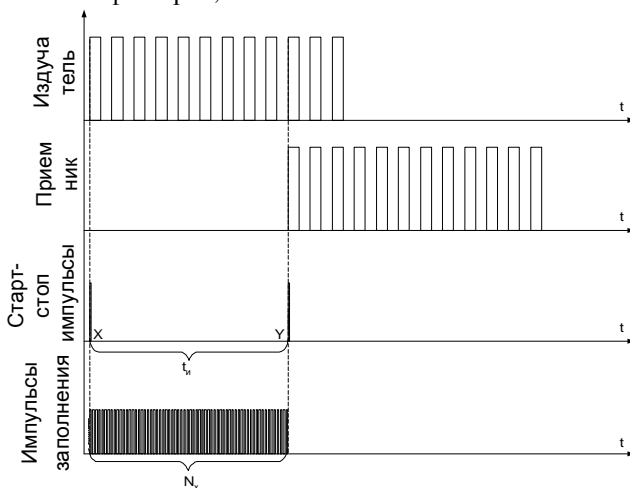


Рис. 2. Временная диаграмма работы ультразвукового измерителя уровня

Выражение для расчета скорости распространения звука в идеальном газе:

$$c = \sqrt{\frac{g p}{r}}, \quad (2)$$

где p – давление в среде распространения звуковой волны; ρ – плотность среды; $g = \frac{C_p}{C_v}$ – отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к теплоемкости газа при неизменном объеме.

Уравнение состояния идеального газа имеет вид:

$$pV = RT, \quad (3)$$

где V – объем, T – температура $^{\circ}\text{K}$, $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$ – универсальная газовая постоянная. С учетом уравнения (3) выражение (2) можно записать в виде

$$c = \sqrt{\frac{gRT}{m}}, \quad (4)$$

где m – молярная масса газа.

При измерении уровня жидких и сыпучих веществ, средой распространения звука чаще всего является воздух. Наиболее вероятной молярной массой воздуха согласно [1] является $m = 29$ г/моль, а коэффициент $g = 1,402$.

Откуда скорость звука при $T = 273$ $^{\circ}\text{K}$ $c = 331,254$ м/с. При изменении температуры на 50°C (а такие колебания температуры наиболее характерны при измерении в течении года вне помещения) погрешность будет составлять $d_T = 10\%$

В звуковой волне, распространяющейся в воздухе, сжатия и разрежения происходят столь быстро, что обмен теплом между соседними слоями воздуха не успевает произойти. Это позволяет считать процесс распространения звука в воздухе адиабатическим. Для идеального газа адиабата описывается уравнением Пуассона $pV^g = \text{const}$. Это справедливо лишь для звуковых волн, длина которых на порядок превосходит длину свободного пробега молекул. Для воздуха при нормальных условиях такая граничная частота составляет 10^5 кГц.

Как уже отмечалось ранее, скорость звука зависит от того, в каком газе он распространяется. Так, при прохождении волн в чистом кислороде скорость звука составляет 316 м/с; скорость звука в углекислом газе равна 259 м/с. Если измерения проводятся при составе воздуха, близком к нормальному, то эта составляющая погрешности не должна превышать $d_g = 5\%$.

В [4] приведены результаты исследований скорости звука от давления для углекислого газа при давлениях от 5 до 98 атм. и температурах от 28 до 35°C . Полученные зависимости показаны на рис. 3.

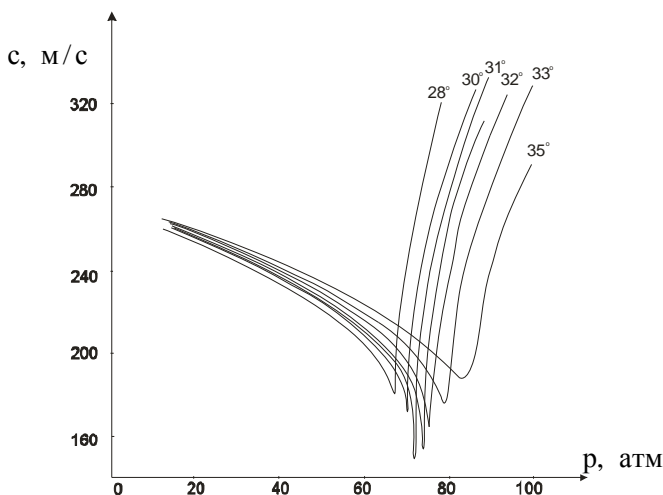


Рис. 3. Зависимость скорости звука от давления в углекислом газе для температур 28-35°C

В критической области кривые изменения скорости звука имеют острый минимум; точные измерения в этой области дают разброс в крутизне этих кривых, но не в значениях скорости звука.

При давлении, близком к атмосферному можно считать, что погрешность, обусловленная изменением давления не превышает 2%: $d_p = 2\%$ [1].

В ряде экспериментов было обнаружено увеличение скорости звука в CO_2 при повышении частоты. На частоте 42 кГц скорость звука составляла 258,8 м/сек, при частоте 98 кГц – 258,9 м/сек, а при 206 кГц – 260,2 м/сек. Классическая теория распространения звука не дает объяснения этому явлению, истолкование которого требует учета внутримолекулярных процессов.

Еще одним фактором, влияющим на скорость прохождения звука в воздухе, является относительная влажность. Из литературы [1] известно, что погрешность, вызываемая ее изменением не превышает $d_g = 1,5\%$.

Из вышесказанного, что скорость распространения звука в воздухе есть функция нескольких переменных:

$$c = f(p, T, g, c),$$

где p – давление; T – температура; γ – показатель адиабаты, характеризующий состав воздуха; c – влажность воздуха.

Следует отметить, что влияние могут оказывать и другие факторы, но более подробное их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

Для расчета суммарной погрешности используем формулу, которая предполагает независимость составляющих погрешности [2]:

$$d_{\Sigma} = \sqrt{d_p^2 + d_T^2 + d_g^2 + d_c^2} \approx 11,4\%:$$

При измерении перечисленных влияющих величин современными высокоточными датчиками, погрешности измерения перечисленных величин ориентировочно будут равны: для влажности – 2%, для давления – 0,5%, для температуры – 0,2%. Определение состава воздуха является наиболее сложной задачей, потому как следует измерять концентрации всех влияющих газов по отдельности, затем по сложной зависимости определять изменение скорости звука. Погрешность при этом может варьироваться в широких пределах, в зависимости от того, концентрацию какого числа газов представляется возможным измерить. Предположим, что эта погрешность будет составлять 5%. тогда суммарная погрешность будет равна 5,4%.

При введении в прибор дополнительного датчика для автоматической периодической поверки, погрешность будет определяться лишь погрешностью фиксации момента времени поступления отраженного звукового сигнала на вход датчика. Эта погрешность в свою очередь определяется погрешностью дискретизации. При использовании современных средств вычислительной техники эта погрешность не будет превышать 1%.

Таким образом, применение дополнительного датчика для периодической автоматической калибровки по сравнению с применением дополнительных датчиков по каждой из влияющих величин является более предпочтительным как точки зрения точностных характеристик прибора, так и с точки зрения его простоты.

Список литературы: 1. <http://www.cta.ru/> – Электронный журнал «Современные технологии автоматизации». 2. *Новицкий П. В., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отделение. 1991. – 204 с. 3. *Кулаков М. В.* Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с. 4. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1967. – 726 с.

Поступила в редколлегию 26.12.08